

REDUCCIÓN DE LOS EFECTOS DE TORSIÓN EN UN EDIFICIO IRREGULAR CON LA INCORPORACIÓN DE AISLADORES DE BASE

Dr. Roberto Aguiar Falconí⁽¹⁾, Juan Castillo Sagbay⁽²⁾ y María Pazmiño Terán⁽³⁾

⁽¹⁾Centro de Investigaciones Científicas
Escuela Politécnica del Ejército.
Correo Electrónico: raguiar@espe.edu.ec

⁽²⁾Carrera de Ingeniería Civil
Escuela Politécnica del Ejército.

RESUMEN

Se presenta el análisis sísmico espacial de una estructura de 6 pisos con aisladores sísmicos colocados sobre el tercer piso, la misma que es sometida ante la acción sísmica estipulada en el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-11., empleando métodos dinámicos aproximados.

Se trabaja con un aislador denominado péndulo de fricción FPS (Frictional Pendulum System); los resultados en términos de desplazamientos y giros se comparan entre: estructura sin aislación; estructura con aislación cuyo centro de rigidez se ubica de acuerdo a las cargas de la superestructura; estructura con aislación cuyo centro de rigidez coincide con el centro de masas y estructura con aislación cuyo centro de rigidez coincide con centro de rigidez de la primera, segunda y tercera planta de la superestructura respectivamente.

ABSTRACT

The paper presents spatial seismic analysis of a 6-story structure with seismic isolators placed over the third floor; the structure is subjected to the seismic action stipulated in the spectrum of the Ecuadorian Standard Construction, NEC-11., using approximated dynamic methods.

Working with an isolator named Frictional Pendulum System FPS; the results in terms of displacement and rotations are compared between: structure without isolators; structure with isolation which stiffness center is located according to the loads of the superstructure; structure with isolation which stiffness center coincide with the mass center and structure with isolation which stiffness center coincide with the first, second and third story of superstructure respectively.

1 INTRODUCCIÓN

En estructuras irregulares se presentan importantes efectos de torsión debido a la acción sísmica, los cuales pueden ser controlados con una apropiada ubicación de los aisladores sísmicos.

Se han realizado importantes estudios sobre el control torsional en edificaciones como los mencionados a continuación:

En Seguí *et al* (2012) se presenta una metodología para lograr el control óptimo de la torsión en la superestructura. A través de técnicas probabilísticas se muestra que la respuesta de la superestructura se puede mejorar sustancialmente si el sistema de aislamiento es elástico a la torsión, y si el centro de rigidez de la base de aislación se encuentra en la proximidad del centro (promedio) de rigidez de la superestructura.

Los sistemas de aislamiento sísmico son dispositivos para mitigar los efectos destructivos de los terremotos en los edificios y su contenido mediante el control de la entrada sísmica. Aunque un gran número de estudios se han realizado durante los últimos 25 años, no existe una metodología sistemática para hacer frente a las superestructuras asimétricas. Es costumbre para diseñar el sistema de aislamiento, simplemente ignorar la torsión en la superestructura, o quizás considerarla sólo como un efecto secundario. Actualmente, el diseñador no tiene criterios de diseño para proporcionar un control eficaz de la torsión en la superestructura.

Las condiciones ideales para el control de la torsión de la superestructura son: que el CR de la base de aislación debe estar en la proximidad del CR (promedio) de la superestructura ($CR^{(b)} \approx CR^{(s)}$); y que la rigidez a la torsión del sistema de aislamiento debe ser tan baja como sea posible. En tal condición, el sistema de aislamiento sísmico será capaz de canalizar las fuerzas sísmicas laterales hacia el CR de la superestructura.

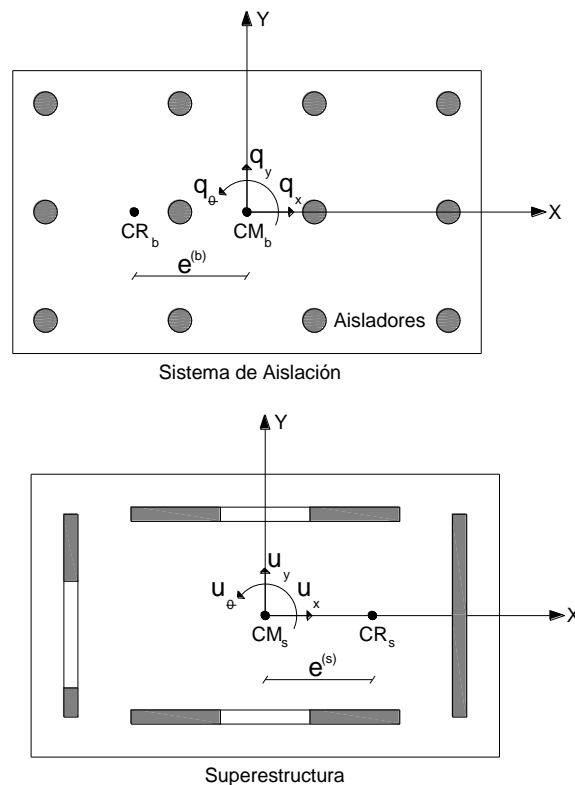


Figura 1 Vista esquemática de los grados de libertad del sistema de aislación y superestructura

Entre las principales conclusiones y recomendaciones están: para compensar los efectos de torsión superestructuras asimétricas aisladas, es necesario introducir excentricidad en el sistema de aislamiento; el balance de torsión de la superestructura aumenta sustancialmente conforme la rigidez a la torsión del sistema de aislamiento disminuye y / o la rigidez a la torsión de la superestructura aumenta. Si el sistema de aislamiento es rígido a la torsión, no es posible, en general, lograr un equilibrio de torsión de la superestructura; la excentricidad requerida en el sistema de aislamiento para equilibrar la superestructura, aumenta con la excentricidad de la superestructura y disminuye con la rigidez a la torsión del sistema de aislamiento.

En Almazán *et al* (2012) se estudia la respuesta de estructuras asimétricas lineales y no lineales sometidas a excitación sísmica unidireccional y bidireccional, equipadas con uno o dos amortiguadores de masa sintonizados. Los resultados muestran que los TMDS reducen la deformación del borde en valores que varían de 20% a 50%. Las mayores reducciones se obtienen en los bordes donde la deformación es mayor. Como regla general, se ha encontrado que el TMD debe estar situado hacia la esquina donde la respuesta no controlada (sin TMD) es mayor. Los resultados de uno o dos TMDS son muy similares, por lo tanto, no hay una mejora significativa resultante de la adición de un segundo TMD.

Estudios relacionados con la aplicación de los amortiguadores de masa sintonizados para estructuras asimétricas sometidas a movimientos sísmicos son relativamente recientes. A pesar de que existen varios edificios reales equipados con TMD, la mayoría de ellos están diseñados para reducir las vibraciones de viento como por ejemplo, John Hancock Tower EE.UU., Park Tower EE.UU., Taipei 101 de Taiwán. No existen casos conocidos en los que TMDS se han diseñado y construido para controlar la respuesta sísmica, y menos aún los efectos de torsión. Sin embargo, en 2007 la construcción de un edificio de 20 pisos cuenta con dos TMDS en la ciudad de Santiago de Chile. Debido a la forma alargada del suelo, dos TMDS se colocaron, cada uno en la proximidad de los bordes de la construcción.

Para el cálculo de los parámetros de diseño de los TMDS, el concepto de equilibrio torsional general se utiliza, que consiste en la reducción de la deformación máxima de entrepiso medida en los bordes de la estructura principal. Este concepto se puede aplicar a cualquier tipo de estructura, sometida a cualquier tipo de excitación.

Entre las principales conclusiones de la investigación se tiene que las frecuencias naturales y la posición óptima de TMD están estrechamente interrelacionados y dependen en gran medida de la rigidez a la torsión, la excentricidad, la relación de rigidez lateral de la estructura principal, y el contenido de frecuencia del movimiento del suelo. Además, el ángulo de orientación de TMD tiene una influencia significativa en la respuesta de la estructura, que aumenta a medida que la excentricidad y la rigidez a la torsión de las principales estructuras crecen.

En Aguirre *et al* (2012) dice que la asimetría estructural es reconocida por los estudios sísmicos modernos y los códigos de construcción como una propiedad de riesgo, indeseable. El acoplamiento lateral-torsional surge de la conducción del plano de asimetría para correlacionar las traslaciones rotaciones de la planta del edificio. Esta correlación genera una demanda de deformación desigual entre los planos de resistencia. Los procedimientos de diseño penalizan la capacidad de las estructuras asimétricas con la intención de limitar esta demanda desigual en planos vulnerables, por lo general al aumentar su rigidez y resistencia.

El uso de dispositivos de disipación de energía (EDD) ha surgido como una de las soluciones más convenientes para el control de las deformaciones en edificios asimétricos. Debido a las limitaciones económicas, EDD debe ser cuidadosamente colocado para mitigar no sólo los desplazamientos de traslación, sino también la respuesta torsional. Los estudios iniciales de asignación óptima de EDD se llevaron a cabo a través de diferentes algoritmos de optimización.

Trabajos recientes proponen el equilibrio torsional como criterio de diseño de estructuras asimétricas con EDD. El balance torsional se define como la propiedad de una estructura asimétrica que conduce a una igual demanda de deformación en los miembros estructurales equidistantes del centro geométrico (CG) de la planta del edificio. Dos estrategias de equilibrio se pueden identificar: (i) el equilibrio fuerte torsión y (ii) el equilibrio débil torsional (WTB). El balance torsional fuerte desacopla los movimientos laterales y de torsión aniquilando rotaciones del plano, llevando a una igual demanda de deformación en todos los elementos estructurales. WTB permite la rotación de la planta del edificio, pero iguala desviaciones estándar de la deformación en los planos de resistencia simétricamente ubicados con respecto al CG.

2 MARCO TEÓRICO

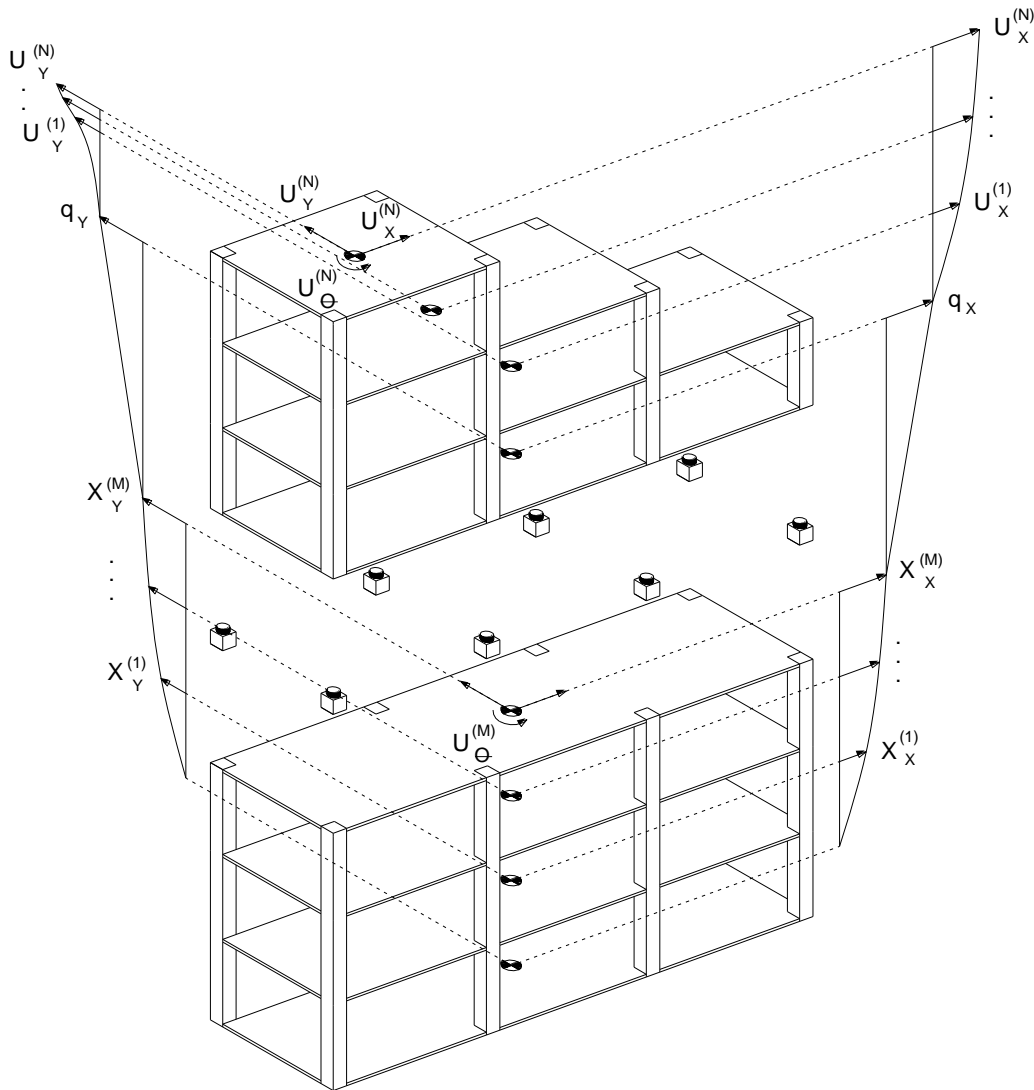


Figura 2 Sistema superestructura – aislamiento considerado y grados de libertad relativos

El análisis sísmico de una estructura con aislamiento en pisos intermedios se realiza mediante la siguiente ecuación diferencial. Seguin (2007).

$$\bar{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{X}} \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{X}} \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{K}} \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{X} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{Q}} * \mathbf{a}(t) \quad (1)$$

Donde: **M** es la matriz de masas; **C** es la matriz de amortiguamiento; **K** es la matriz de rigidez; **Q** es la matriz de cargas; **a(t)** es el vector de aceleraciones espectrales; **U** es el vector con desplazamientos de la superestructura; **q** es el vector con desplazamientos del sistema de aislamiento; **X** es el vector con desplazamientos de la subestructura.

La matriz de masas **M** deducida a partir del análisis de la energía cinética se muestra a continuación junto con la matriz de rigidez **K**, matriz de amortiguamiento **C** y matriz de cargas **Q**.

$$M = \begin{bmatrix} m^{(s)} & m^{(s)} r^{(s)} & m^{(s)} r^{(s)} r^{(b)} \\ r^{(s)T} m^{(s)} & r^{(s)T} m^{(s)} r^{(s)} + m^{(b)} & (r^{(s)T} m^{(s)} r^{(s)} + m^{(b)}) r^{(b)} \\ r^{(b)T} r^{(s)T} m^{(s)} & r^{(b)T} (r^{(s)T} m^{(s)} r^{(s)} + m^{(b)}) & r^{(b)T} (r^{(s)T} m^{(s)} r^{(s)} + m^{(b)}) r^{(b)} + m^{(i)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K = \begin{bmatrix} KE^{(s)} & 0 & 0 \\ 0 & KE^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & KE^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} C^{(s)} & 0 & 0 \\ 0 & C^{(b)} & 0 \\ 0 & 0 & C^{(i)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q = \begin{bmatrix} m^{(s)} r^{(s)} r^{(b)} \\ (r^{(s)T} m^{(s)} r^{(s)} + m^{(b)}) r^{(b)} \\ r^{(b)T} (r^{(s)T} m^{(s)} r^{(s)} + m^{(b)}) r^{(b)} + m^{(i)} \end{bmatrix} * r^{(i)} \quad (5)$$

Donde: $m^{(s)}$ es la matriz de masa de la superestructura; $m^{(i)}$ es la matriz de masa de la subestructura; $m^{(b)}$ es la matriz de masa del sistema de aislación; $r^{(s)}$ es la matriz de incidencia de la superestructura; $r^{(i)}$ es la matriz de incidencia de la subestructura; $r^{(b)}$ es la matriz de incidencia del sistema de aislación; $KE^{(s)}$ es la matriz de rigidez en coordenadas de piso de la superestructura; $KE^{(i)}$ es la matriz de rigidez en coordenadas de piso de la subestructura; $KE^{(b)}$ es la matriz de rigidez en coordenadas de piso del sistema de aislación; $C^{(s)}$ es la matriz de amortiguamiento de la superestructura; $C^{(i)}$ es la matriz de amortiguamiento de la subestructura; $C^{(b)}$ es la matriz de amortiguamiento del sistema de aislación.

3 AISLADOR FPS

Los aisladores sísmicos péndulo friccional (FPS) cuentan con un deslizador articulado que se mueve sobre una superficie esférica de acero inoxidable, este movimiento permitirá que ante un evento sísmico se disipe energía por fricción. El deslizador articulado esta revestido con un material compuesto de alta capacidad de soporte basado en politetrafluoroetileno que tiene un bajo coeficiente de fricción.

El aislador FPS mostrado en la figura 3 corresponde a la primera generación y es el que se va a utilizar en la resolución del ejemplo de aplicación.

Los FPS son aisladores autocentrantes, es decir que la estructura regresa a su posición inicial después de un movimiento sísmico, debido a su peso propio. Aguiar *et al.* (2008).

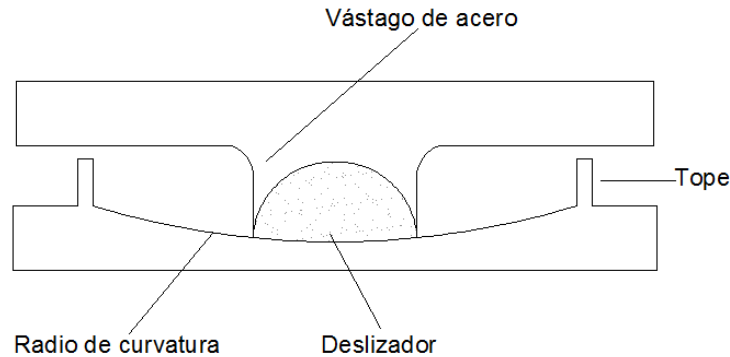


Figura 3 Esquema de un aislador FPS

Para el cálculo de la rigidez del aislador FPS se relaciona el peso que gravita sobre el aislador W y el radio de curvatura R como se señala en la ecuación 7. El radio de curvatura se determina con la ecuación 6.

$$R = \left(\frac{T_o}{2\pi} \right)^2 * g \quad (6)$$

$$k_b^{(i)} = \frac{W}{R} \quad (7)$$

Siendo: T_o el período objetivo del aislador y g la aceleración de la gravedad.

La matriz de rigidez en coordenadas de piso del sistema de aislación FPS se encuentra con la matriz 8. La figura 4 muestra la disposición de las rigideces en el sistema de aislación.

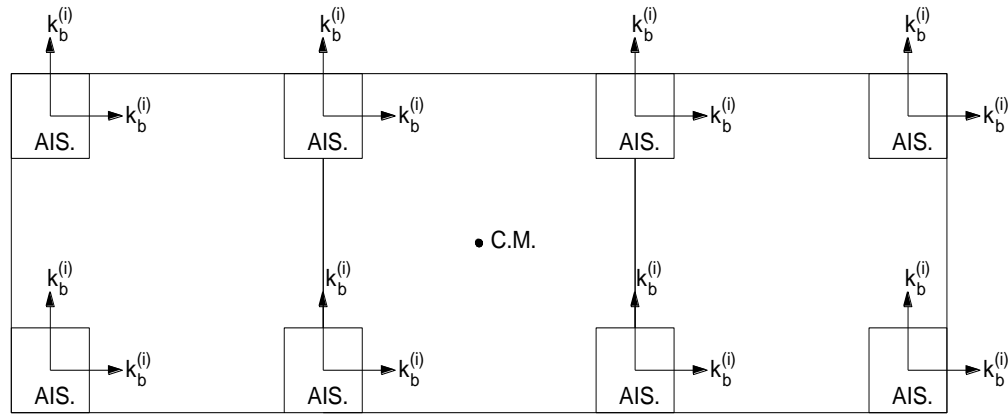


Figura 4 Disposición de las rigideces del sistema de aislación

$$KE^{(b)} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde K_{xx} , K_{yy} las matrices de rigidez lateral por traslación en sentido X, Y, respectivamente; $K_{\theta\theta}$ es la matriz de rigidez torsional; K_{xy} es la matriz de acoplamiento traslacional entre las direcciones X, Y; $K_{x\theta}$, $K_{y\theta}$ son matrices de rigidez de acoplamiento de torsión con desplazamiento. Aguiar (2012).

La matriz de masas del sistema de aislación $m^{(b)}$ toma la forma que se muestra en la matriz 9:

$$m^{(b)} = \begin{bmatrix} m_b & & \\ & m_b & \\ & & J_b \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde: m_b es la masa total de piso de aislación; J_b es el momento de inercia de la masa m_b con respecto al centro de masas CM. La ecuación 10 muestra el cálculo del J_b .

$$J_b = \frac{m_b}{12} (a^2 + b^2) \quad (10)$$

La matriz de amortiguamiento C^b se calcula por combinación de la rigidez KE^b y la matriz de masas m^b , haciendo uso del teorema de Wilson y Penzien.

El amortiguamiento efectivo $\xi_{efe.}$ es la relación entre la energía disipada en un ciclo de histéresis y la energía elástica. Para su cálculo, es necesario imponerse un desplazamiento q del sistema de aislación.

$$\xi_{efe.} = \frac{2}{\pi} * \frac{\mu}{\mu + \frac{q}{R}} \quad (11)$$

Donde: μ es el coeficiente de fricción entre el material de recubrimiento del deslizador y la superficie de acero.

Con este valor de $\xi_{efe.}$ se verifica si el desplazamiento del sistema de aislación es en realidad el asumido. Aguiar (2012).

4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Realizar el análisis sísmico espacial en Y de la estructura sin aislación cuya geometría y cargas verticales se muestran en las figuras 5 y 6 respectivamente. Se considera un valor de reducción de fuerzas sísmicas $R=4$.

Adicionalmente se realizará el análisis sísmico de la misma estructura pero colocando aisladores de base FPS en la tercera planta de la estructura, de manera que la geometría de la misma quedaría como se muestra en la figura 7 y las cargas verticales actuantes en la figura 8.

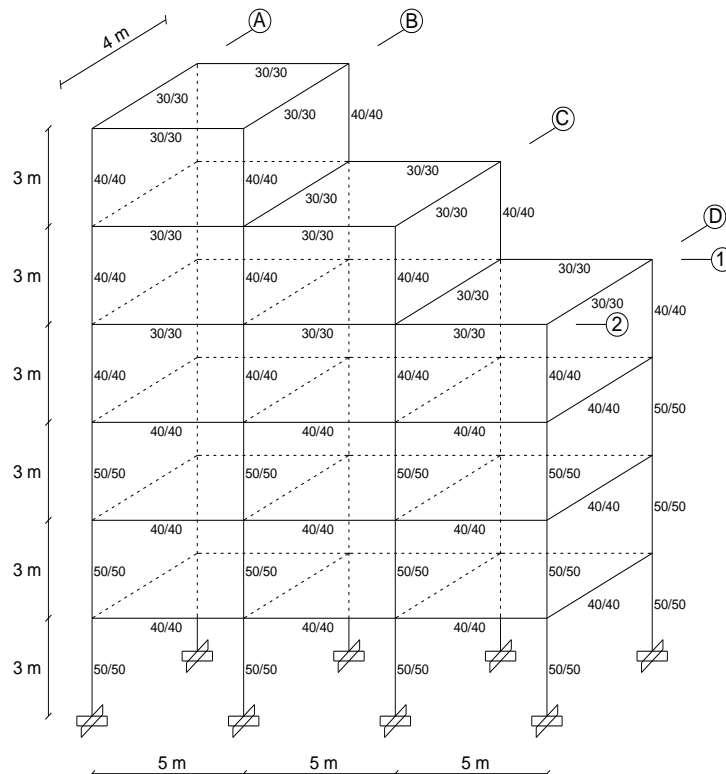


Figura 5 Geometría – Estructura sin aislación

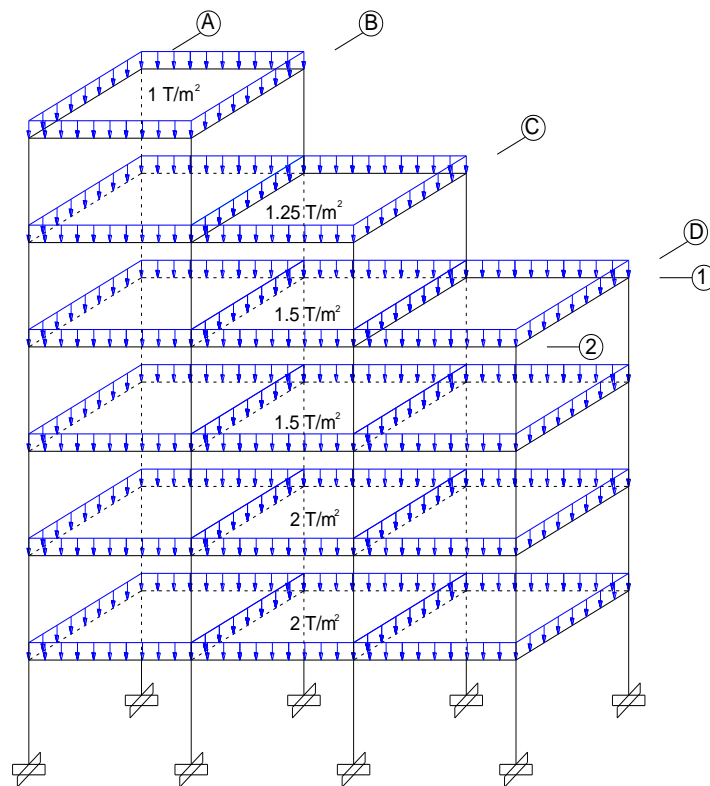


Figura 6 Cargas - Estructura sin aislación

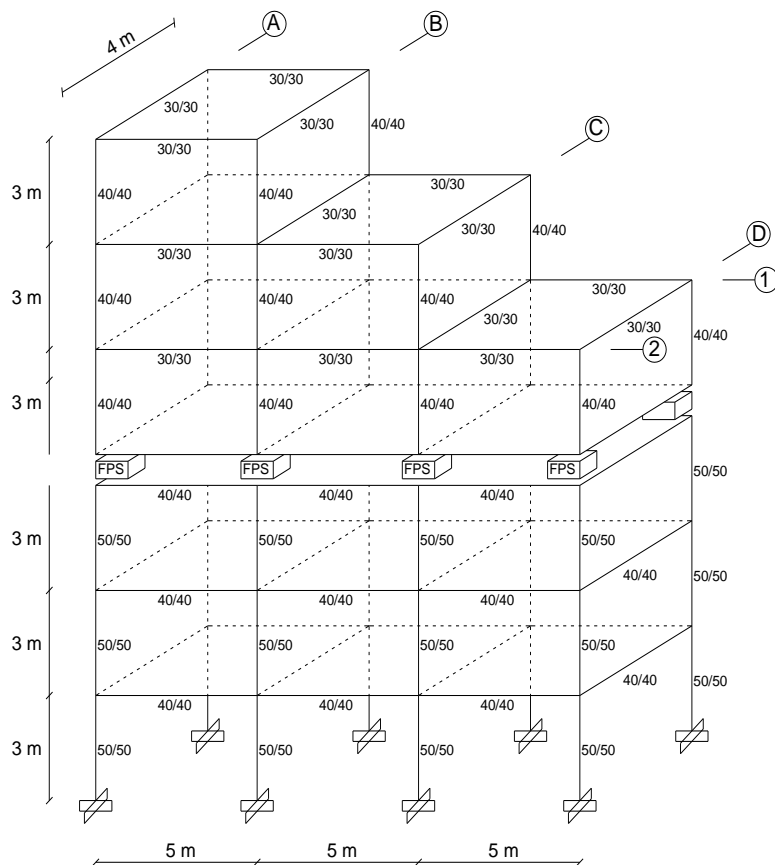


Figura 7 Geometría – Estructura con aislación

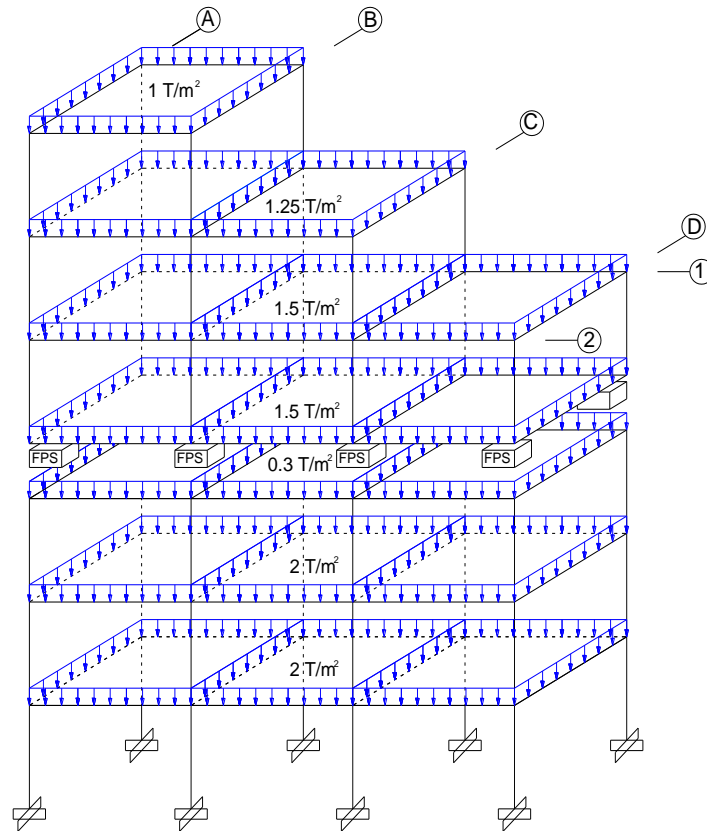


Figura 8 Cargas - Estructura con aislación

Las estructuras se hallan ubicadas en la ciudad de Quito sobre un perfil de suelo tipo "C". El módulo de elasticidad del hormigón es de 2400000 T/m^2 . Los grados de libertad en coordenadas de piso para el análisis sin aislación se muestran en la figura 9, mientras que los del análisis con aislación en la figura 10.

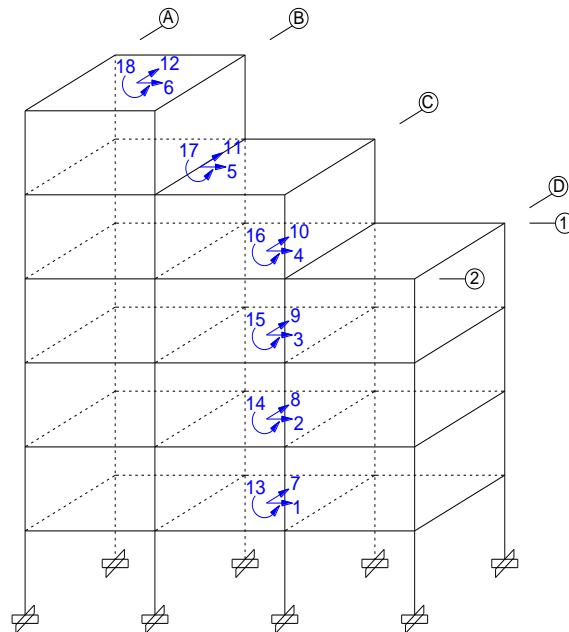


Figura 9 Grados de libertad - Estructura sin aislación

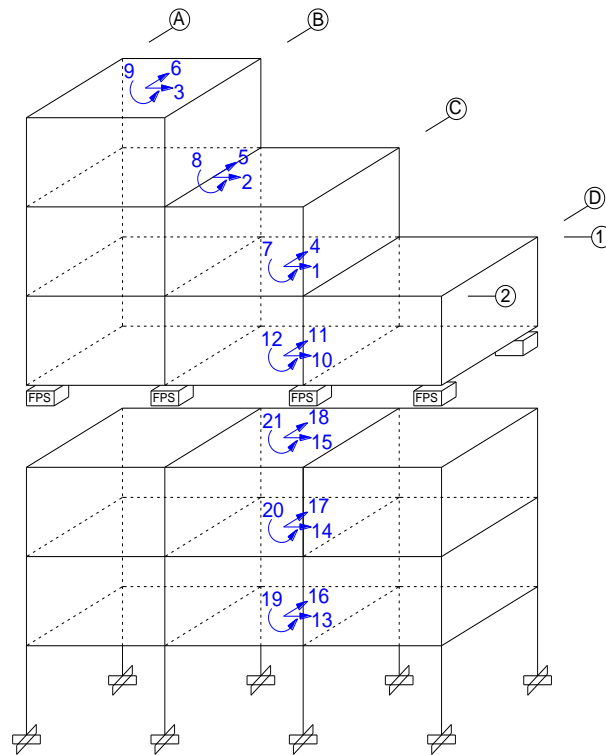


Figura 10 Grados de libertad - Estructura con aislamiento

El análisis sísmico espacial con aislamiento se realizará en el sentido Y, considerando un valor de reducción de fuerzas sísmicas $R=2$. Se coloca aisladores FPS de la primera generación en el tercer piso, los mismo que tienen un coeficiente de fricción $\mu=0.10$, con un período objetivo de 2.50 segundos. Dentro de este análisis se considerarán los siguientes casos:

1. El centro de rigidez del sistema de aislamiento se ubicará de acuerdo a las solicitaciones de cargas de la estructura.
2. El centro de rigidez del sistema de aislamiento coincidirá con el centro de masas de dicho sistema.
3. El centro de rigidez del sistema de aislamiento coincidirá con los centros de rigidez de la primera, segunda y tercer planta de la superestructura mostrados en las figuras 11, 12 y 13 respectivamente.

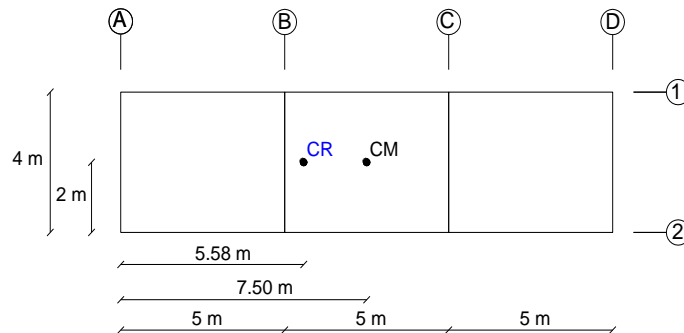


Figura 11 Centro de rigidez de la primera planta de la superestructura

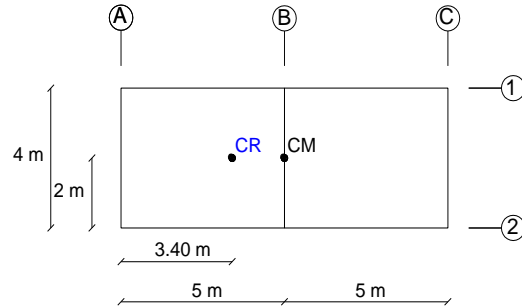


Figura 12 Centro de rigidez de la segunda planta de la superestructura

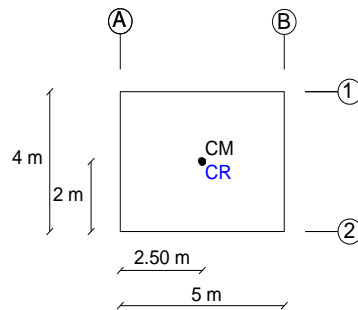


Figura 13 Centro de rigidez de la tercera planta de la superestructura

5 RESULTADOS

Del análisis sísmico de los modelos matemáticos presentados en el apartado anterior se obtuvieron los diferentes desplazamientos y giros de la estructura con aisladores FPS. Las tablas 1 y 2 presentan los desplazamientos y giros inelásticos del análisis espacial aplicando sismo en el sentido Y.

Tabla 1 Desplazamientos y giros inelásticos

PISO	CASO 1 Sin aislación		CASO 2 (Cargas) CR = 6.60 m		CASO 3 (CR=CM) CR = 7.50 m	
	Desp. (m)	Giro (rad)	Desp. (m)	Giro (rad)	Desp. (m)	Giro (rad)
Sup. 1	0.17839	0.01942	0.00893	0.00063	0.00953	0.00063
Sup. 2	0.27098	0.02695	0.02491	0.00160	0.02675	0.00158
Sup. 3	0.38852	0.03203	0.04042	0.00220	0.04341	0.00213
Aislación	-	-	0.28170	0.02773	0.28993	0.00034
Sub. 1	0.02726	0.00278	0.01843	0.00042	0.01868	0.00001
Sub. 2	0.07411	0.00769	0.04455	0.00117	0.04534	0.00003
Sub. 3	0.12092	0.01278	0.06211	0.00189	0.06360	0.00005

Tabla 2 Desplazamientos y giros inelásticos

PISO	CASO 4 CR = 5.58 m		CASO 5 CR = 3.40 m		CASO 6 CR = 2.50 m	
	Desp. (m)	Giro (rad)	Desp. (m)	Giro (rad)	Desp. (m)	Giro (rad)
Sup. 1	0.00857	0.00071	0.00779	0.00089	0.00739	0.00097
Sup. 2	0.02435	0.00180	0.02348	0.00222	0.02311	0.00240
Sup. 3	0.04025	0.00249	0.04069	0.00306	0.04105	0.00332
Aislación	0.29042	0.03106	0.33305	0.03883	0.37059	0.04546
Sub. 1	0.01827	0.00054	0.01791	0.00073	0.01773	0.00080
Sub. 2	0.04404	0.00150	0.04294	0.00201	0.04240	0.00220
Sub. 3	0.06116	0.00240	0.05918	0.00319	0.05821	0.00349

6 CONCLUSIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar R., (2012), Dinámica de estructuras con CEINCI-LAB, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
2. Aguiar R., Almazán J., Dechent P., Suarez V., (2008), Aisladores de base elastoméricos y FPS, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Quito.
3. Aguirre J., Almazán J., Paul C., (2012), Optimal control of linear and nonlinear asymmetric structures by means of passive energy dampers. Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Diego Portales.
4. Almazán J., Espinoza G., Aguirre J., (2012), Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de Universidad del Bío Bío.
5. Seguin C., Almazán J., De la Llera J., (2012), Torsional balance of seismically isolated asymmetric structures, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
6. Seguin C., (2007), Torsión en sistemas aislados sísmicamente con dispositivos elastomérico, Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.